

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv parametrů obrábění na profil tvrdosti vybraných
materiálů

Influence of Machining Parameters on Hardness
Profile of Selected Materials

Student: David Brotánek

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **David Brotánek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv parametrů obrábění na profil tvrdosti vybraných materiálů**
Influence of Machining Parameters on Hardness Profile of Selected Materials
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analýza vlivu řezných parametrů na výsledné vlastnosti obráběného materiálu.
2. Návrh experimentální části.
3. Řešení experimentu, měření dat.
4. Hodnocení vybraných parametrů integrity povrchu.
5. Závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v tryskovom obrábění*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 4.5. 2016


.....


podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 + užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
 - beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3)
 - souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
 - bylo sjednáno, že VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
 - bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
 - beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- V Ostravě

V Ostravě4.5. 2016.....

..........

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: David Brotánek

Adresa trvalého pobytu autora: Družba 1195, Hulín

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Brotánek, D. *Vliv parametrů obrábění na profil tvrdosti vybraných materiálů*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 44s. Vedoucí práce Petrů, J.

Bakalářská práce pojednává o vlivu parametrů obrábění na tvrdost povrchové vrstvy materiálu Inconel 718. První část je zaměřena na niklové superslitiny, jejich charakteristiku, využití a následně na jejich obrobiteľnost. V další části je věnována pozornost metodám měření tvrdosti a mikrotvrdosti. Následuje popsání zákonitostí vlivu řezných podmínek na tvrdost vybraného materiálu a nastínění využití analytického nástroje MSA. Druhá část je zaměřena na kalibraci měřicího přístroje, následuje měření na vzorcích a vyhodnocení výsledků pomocí MSA. V závěrečné části je realizováno měření na obrocích, které jsou obrobeny odlišnými řeznými podmínkami. Naměřená tvrdost se porovnává s řeznými parametry.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Brotánek, D. *Influence of Machining Parameters on Hardness Profile of Selected Materials*: bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 44p. Bachelor thesis, head: Petrů, J.

This bachelor's thesis deals with the influence of machining parameters on hardness of surface coating of the INCONEL 718 material. The first part is focused on nickel superalloys, their characteristics, utilization and subsequently on their machinability. In the next part, I dealt with methods of measurement of hardness and microhardness, followed by description of regularity of effect of cutting conditions on hardness of selected material as well as the utilization of the analytical MSA device. The second part is concentrated on calibration of the measuring device, followed by measurement on specimens and evaluation of the results through the use of the MSA. In the final part, I implemented measurement on workpieces which are machined by diverse cutting conditions. Eventually, the measured hardness is compared to the cutting parameters.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod	9
1. Stávající stav řešené problematiky.....	10
1.1. Niklové superslitiny	10
1.1.1. Rozdělení a využití.....	11
1.1.2. Zaměření na Inconel 718	12
1.2. Obrábění niklových superslitin.....	13
1.2.1. Soustružení, frézování a vrtání	14
1.3. Měření tvrdosti.....	15
1.3.1. Zkouška tvrdosti podle Brinella	16
1.3.2. Zkouška tvrdosti podle Vickerse	17
1.3.3. Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	19
1.3.4. Měření mikrotvrdosti	20
1.3.5. Přenosné tvrdoměry.....	21
1.3.5.1. Přístroje používající statickou metodu měření tvrdosti	22
1.3.5.2. Přístroje používající dynamickou metodu.....	23
1.4. Vliv obrábění na změnu tvrdosti	24
1.4.1. Ukázka vlivu obrábění na tvrdost pro materiál	24
1.5. Analytické a statistické nástroje	25
1.5.1. Analýza systému měření.....	26
2. Experimentální část	28
2.1. Měřicí nástroj	28
2.2. Návrh a provedení experimentu	29
2.2.1. Měření na kalibračních destičkách.....	29
2.2.2. Měření vzorků z materiálu Inconel 718 a.....	32
2.2.3. Měření na reálných dílcích.....	37
3. Závěrečné zhodnocení	39
Použitá literatura.....	42

Seznam použitých značek a symbolů

A	kontaktní plocha	[mm ²]
ČSN	česká státní norma	[-]
D	průměr vtlačovaného tělíska	[mm]
E	chyba měření	[%]
EN	evropská norma	[-]
E _d	elastický modul diamantu	[-]
E _p	elastický modul zkoušeného materiálu	[-]
F	zatěžující síla	[N]
F ₀	předběžné zatížení	[N]
F ₁	přídavné zatížení	[N]
HB	tvrdost dle Brinella	[-]
HBS	tvrdost dle Brinella (kulička z kalené oceli)	[-]
HBW	tvrdost dle Brinella (kulička z SK)	[-]
HRC	tvrdost dle Rockwella	[-]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
Max	nejvyšší naměřená hodnota	[-]
Min	nejnižší naměřená hodnota	[-]
MSA	analýza systému měření	[-]
Ni-20Cr	typ slitiny na bázi niklu a chromu	[-]
NI-PH2601	označení slitiny Inconel 718	[-]
NiCr	tuhý roztok niklu a chromu	[-]
NiCr19NbMo	chemické označení slitiny Inconel 718	[-]
NiCrFe	tuhý roztok niklu, chromu a železa	[-]
R	rozptyl naměřených hodnot	[%]
R plus R	měřidla analýzy systému měření	[-]

SK	slinutý karbid	[-]
UCI	metoda měření tvrdosti	[-]
a_p	tloušťka obráběné vrstvy	[mm]
d	velikost vtisku	[mm]
d_1, d_2	rozměry úhlopříček	[mm]
f	posuv na otáčku	[mm]
f_0	rezonanční frekvence	[Hz]
h	hloubka vtisku	[mm]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_d	Poissonovo číslo diamantu	[-]
v_p	Poissonovo číslo zkoušeného materiálu	[-]
γ	matrice, tuhý roztok niklu a chromu	[-]
γ'	koherentní vytvrzující fáze Ni ₃ Al	[-]
σ	směrodatná odchylka	[%]
Δf	dodatečná zpětná síla	[N]

Úvod

Pokud je řeč o niklových superslitinách, bere se na vědomí, že jde o těžkoobrobitelné materiály, které se vyznačují výbornou mechanickou pevností při vysokých teplotách a výbornou odolností proti vnějším vlivům. Proto jsou tyto materiály stěžejní pro letecký, chemický a petrochemický průmysl nebo energetiku.

Ke zpracování těchto materiálů neodmyslitelně patří obrábění, při kterém dochází ke změně tvrdosti povrchové vrstvy obrobeného materiálu. Hodnota tvrdosti je velmi důležitá charakteristika materiálu. Udává obraz o odolnosti materiálu proti opotřebení nebo např. o jeho následovné opracovatelnosti. Proto je velmi žádoucí znát vliv řezných podmínek, kterými je daný materiál obráběn na hodnotu tvrdosti povrchové vrstvy obrobku.

Tato bakalářská práce je zaměřena na posouzení vlivu parametrů obrábění na výslednou tvrdost materiálu Inconel 718. Posouzení je zpracováno jak na základě teoretických poznatků z odborné literatury, tak i pomocí experimentu, který byl proveden ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

Zmíněný experiment se skládá ze dvou částí. Ta první část zahrnuje kalibraci přenosného tvrdoměru, který zakoupila firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. pro zjištění, zda bude přístroj vyhovovat provozním podmínkám v dílnách. Následuje měření na vzorcích, přičemž výsledné hodnoty jsou podrobeny analytické a statistické metodě MSA (Measurement System Analysis). Výstup tohoto statistického nástroje napoví, jestli je měření prováděno efektivně, či nikoli. Druhá část experimentu se zabývá měřením tvrdosti na reálných dílcích z materiálu Inconel 718, které jsou obrobeny za různých řezných podmínek a porovnáním výsledných hodnot.

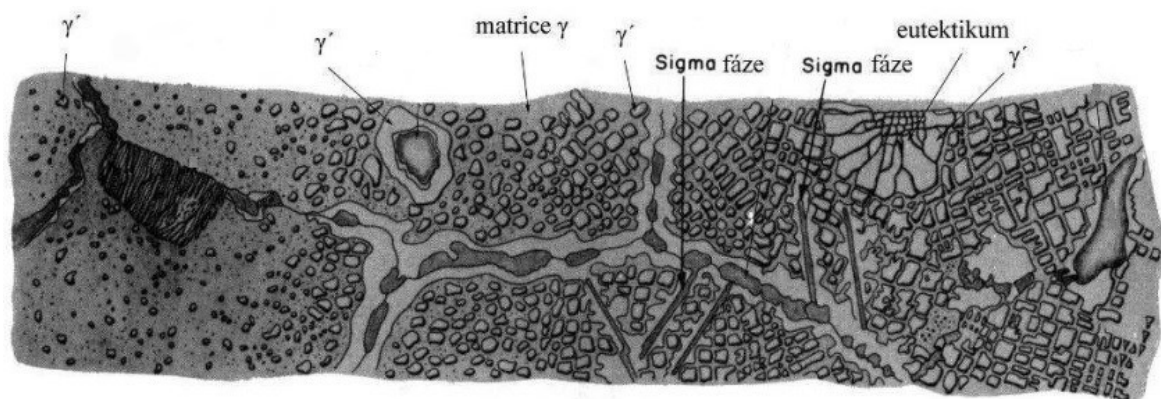
1. Stávající stav řešené problematiky

V následujících podkapitolách jsou shrnuty teoretické poznatky, které jsou důležité pro navazující praktické řešení experimentu.

1.1. Niklové superslitiny

Za předka niklových superslitin se mohou brát žáruvzdorné slitiny typu Ni-20Cr, využívané už v průběhu 30. let 20. století. Důležitým posunem bylo přidání Al a Ti do zmíněných slitin a zvládnutí procesu, jenž se nazývá precipitační vytvrzování. Mezi první vytvrditelné superslitiny patří Nimonic 80. Její patent je datován v roce 1940. Tímto započal velmi razantní výzkum a vývoj a to díky tomu, že niklové superslitiny se projeví jako nepostradatelný materiál v leteckém průmyslu. Při jejich použití se mohou zvýšit pracovní teploty turbínových motorů a tím se zákonitě zvýší účinnost a výkon. Pracovní teploty se změnily z dřívějších 700 na aktuálních 1100 °C. Najdeme zde i jistou spodní hranici teploty použitelnosti, která kolísá kolem 650 °C. Pochopitelně tahle hranice existuje jen z ekonomických aspektů. Pod tuto hranici teploty je možné bez omezení využívat další, finančně přijatelnější konstrukční materiály, například austenitické korozi-vzdorné oceli. [13]

V dnešní době jsou za superslitiny považovány komplexně legované materiály na bázi Fe, Co nebo Ni, vyznačující se výbornou mechanickou pevností při vysokých teplotách a velmi dobrou odolností vůči vnějším vlivům. Stěžejní prvek je nikl, jenž je ve slitině obsažen od 50 – 75 %. Neodlučitelné vlastnosti jako žáruvzdornost a žárupevnost jsou ovlivněny obsahem legujících prvků. Odolnost proti korozi poskytuje chrom a hliník. Ke zpevnění matrice se využívá molybden, wolfram, niob a tantal. Mezi další legující prvky patří bor a zirkon. Ty pro změnu zamezují hrubnutí karbidů a zvyšují odolnost vůči tažnosti. [7]



Obr. 1.1 Historický vývoj precipitačně zpevněných niklových superslitin (zleva doprava) [12]

1.1.1. Rozdělení a využití

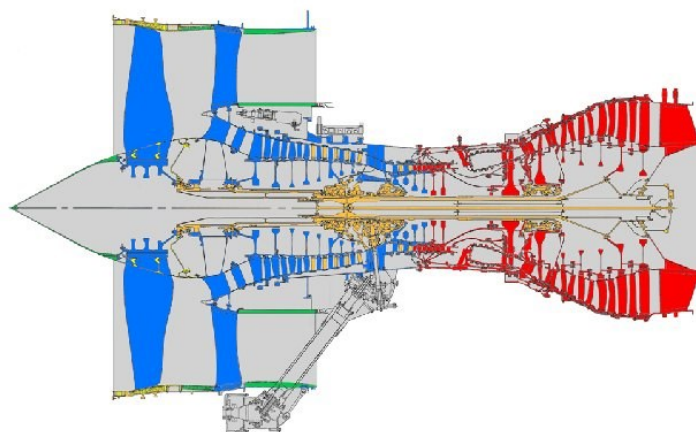
Slitiny se v základu rozdělují na žáruvzdorné a žárupevné.

Žáruvzdorné slitiny jsou zpevněny jen substitučně. Vrchní teplota použitelnosti je přibližně 1150 °C, ale s předpokladem, že na ně není kladeno žádné mechanické napětí. Matrice je tvořena tuhým roztokem NiCr, který obsahuje 10 až 30 % chromu, popřípadě méně nákladná obměna NiCrFe s obsahem železa 5 až 20 %. Za substituční zpevnění tuhého roztoku mohou prvky, jako jsou hlavně molybden, kobalt a wolfram. [30]

Žárupevné slitiny zachovávají své mechanické vlastnosti do 950 °C i za předpokladu mechanického napětí. Mechanismů zpevnění je mnoho. Tyto slitiny jsou zpevněné substitučně, karbidy, popř. disperzně, ale primární způsob precipitační zpevnění koherentními precipitáty. [24]

Letecký průmysl zaujímá širokou oblast využití – vysokoteplotní a vysoce namáhané součásti leteckých turbínových motorů, do kterých spadají tvářené výrobky i odlitky. Mezi odlitky patří zejména lopatky nebo integrálně litá kola. Naopak mezi tvářecí výrobky patří oběžná a rozváděcí kola pomocných energetických jednotek, spalovací komory apod. [18]

V energetice to jsou převážně součásti parních a spalovacích turbín. Nástroje, které jsou používány při práci ve vysokých teplotách. Výfukové ventily a turbodmychadla v automobilovém průmyslu. Teplem exponované pláště a součásti raketového motoru v astronautice. Hnací mechanismy regulačních tyčí a armatury reaktorů v jaderné energetice. Potrubí a reaktory v chemickém a petrochemickém průmyslu. [18]



Obr. 1.2 Příklad použití niklových superslitin v tryskovém motoru Rolls-Royce
(červená barva) [27]

1.1.2. Zaměření na Inconel 718

Z důvodu závěrečného měření tvrdosti reálných dílců z materiálu Inconel 718 v praktické části bakalářské práce je na tento materiál kladena bližší pozornost.

Chemický vzorec této slitiny je NiCr19NbMo a je možné ji také najít pod označením NI- PH2601. Inconel 718 je nejpoužívanější superslitinou, která představuje jednu třetinu veškeré výroby superslitin. Tato slitina vyvinutá společností International Nickel Company v padesátých letech 20. století má vynikající pevnost, tažnost a houževnatost v celém rozsahu $-253 - 760\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hlavním atributem je její zpracovatelská univerzálnost. Inconel 718 je jedinečný mezi slitinami na bázi niklu, protože vyniká dobrou svařitelností a velmi dobře odolává stárnutí. Vyznačuje se také výbornou odolností proti korozi a oxidaci a k tomu i dobrou tvárností. Má také dobrou korozní odolnost vůči mořské vodě, která je atraktivní v námořních aplikacích. Její hlavní využití najdeme v konstrukčních aplikacích v leteckém, jaderném a petrochemickém průmyslu. Typické aplikace tohoto materiálu zahrnují kompresory a disky turbíny, nosné části a šrouby v tryskových motorech, raketové komponenty, jenž jsou vystaveny kryogenním teplotám a dále např. napájecí baterie pro satelity. [5] [29]

V následující tabulce je zobrazeno chemické složení Inconelu 718.

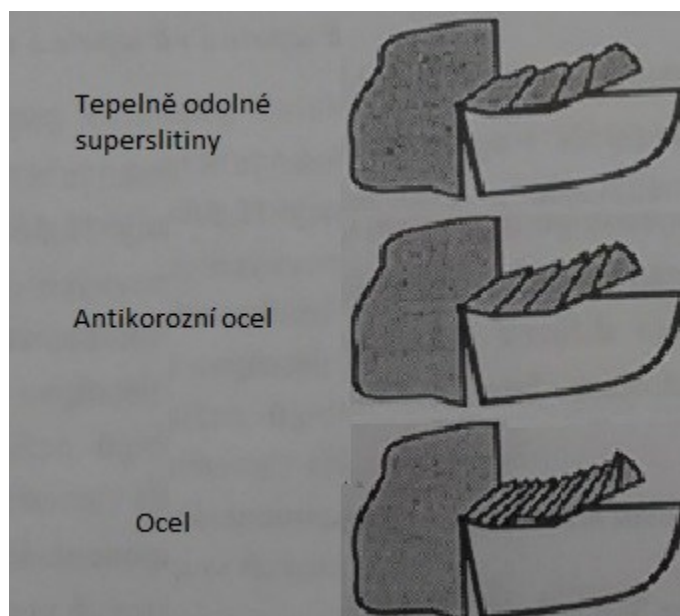
Tab. 1 Chemické složení Inconelu 718 [29]

Prvek	Hmotnost [%]	Prvek	Hmotnost [%]
Ni	50,0 – 55,0	Mn	0,35
Cr	17,0 – 21,0	Si	0,35
Nb	4,75 – 5,5	Ti	0,3
Mo	2,8 – 3,3	C	0,08
Al	0,65 – 1,15	S	0,015
Co	1	P	0,015
Cu	0,2 – 0,8	B	0,006
Fe	zůstatek		

1.2. Obrábění niklových superslitin

Superslitiny jsou všeobecně považovány jako materiály s velmi špatnou obrobitelností, jinými slovy jako těžkoobrobitelné.

Superslitiny niklu si zachovávají vysokou pevnost i při vysokých teplotách, která je při obrábění charakteristická a mají neobyčejně vysokou pevnost při dynamickém stříhu. To je také příčinou vysoké řezné síly v porovnání s jinými materiály. Jako příklad poslouží obr. 1.3. [17]



Obr. 1.3 Vizuální porovnání řezných sil při obrábění oceli, antikorozi oceli a superslitin [17]

Přítomnost tvrdých karbidů v superslitinách dělá tyto materiály abrazivními se všemi důsledky na opotřebení nástroje.

Mezi hlavní faktory podmiňující špatnou obrobitelnost superslitin niklu patří: [17]

- nízká tepelná vodivost
- vysoká náchylnost k deformačnímu zpevnění, tzv. samovytvrzování
- vysoký sklon k adhezi
- žárupevnost (velká aktivační energie difúze)

Tyto uvedené faktory jsou vlastní každému druhu z vysokopevnostních materiálů a na jejich obrobitelnost působí společně. Intenzita tohoto spolupůsobení závisí na aktivační energii difúze jejich chemických prvků a jejich obsahu. [17]

Při obrábění superslitin se mohou použít nástroje z rychlořezné oceli, ze spékanych karbidů bez povlaků a z nekovových materiálů, zejména z řezné keramiky, kubického nitridu bóru nebo diamantu. Z rychlořezných ocelí jsou vhodné pouze rychlořezné oceli výkonné a vysokovýkonné a to především tam, kde druh nástroje a povaha operace nedovoluje uplatnění nástroje z SK, např. při přerušovaném řezu. [23]

Pro volbu optimálního druhu SK materiálu je rozhodující charakter namáhání řezné hrany nástroje. Řezná hrana nástroje je při obrábění namáhána mechanicky na ohyb nebo rázy a také třením. Opotřebení řezné hrany otěrem můžeme rozdělit na: [17]

- mechanický otěr, který vzniká v oblasti nízkých teplot obrábění a způsobuje opotřebení hřbetu nástroje,
- fyzikálně – chemický otěr, který vzniká při obrábění velkými řeznými rychlostmi a při vysokých teplotách obrábění.

Povlakované SK destičky se při obrábění superslitin nepoužívají, protože povlak velmi rychle zmizí a tím se ztratí pozitivní účinek na řezný proces. Tím pádem to nedává smysl i z ekonomického hlediska. Řezné materiály ze slinutých karbidů jsou však nejvýznamnější skupinou pro obrábění širokého spektra superslitin. [4]

1.2.1. Soustružení, frézování a vrtání

Nejméně problematické ze všech druhů operací s těžkoobrobitelnými materiály je soustružení. Nejfrekventovaněji jsou používány soustružnické nože s vyměnitelnými

břitovými destičkami z řezné keramiky a slinutých karbidů, a nebo také celistvé nástroje z rychlořezné oceli. Pomocí slinutých karbidů je možné obrábět niklové slitiny identickými řeznými rychlostmi stejně jako majoritu těžkoobrobitelných materiálů a to $30 - 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Lze je doporučit pro široké spektrum soustružnických operací, mezi něž patří hlavně nepřerušované řezání. U přerušovaného řezání je možné použít nástroje z rychlořezné oceli jen v takovém případě, jako je třeba hrubování nerovného povrchu. Další použití, při kterém jsou spatřeny je obrábění na čisto, kde je nutné dbát pozornost na toleranční rozměry, kvůli docílení hladkých povrchů a zamezení vniku nadbytku zbytkového napětí do materiálu. [4] [6]

Mezi hlavní podmínky u frézování patří hladký povrch a vysoká přesnost. Ostré nástroje a s nimi spojené tuhé upnutí jsou potřebné k dosažení zmíněných podmínek. Během frézování niklových superslitin, které spadají pod těžkoobrobitelné materiály, nastává několik problémů, jenž přímo plynou z povahových rysů obráběných materiálů. Vezmou-li se v potaz vlastnosti niklových superslitin, je naléhavé zaměřit zájem na výběr obráběcího stroje, řezného nástroje, řezného prostředí a řezných podmínek podobně jako u soustružení nebo vrtání a to vždy na základě typu obráběné niklové superslitiny. Jedna z následujících klíčových vlastností je počet zubů v záběru. V záběru musí být minimálně dva zuby frézy v jednom momentu, což zapříčiní výhodnější stabilitu řezného procesu. Pro frézování niklových slitin jsou nejvýhodnější nástroje z rychlořezné oceli, obzvlášť pro přerušované řezání. [4] [6] [11]

Pokud se při vrtání niklových superslitin nedodrží předepsaný průběh, mohou nastat problémy, které zapříčiní především vysoká mez pevnosti a náchylnost se zpevňovat. Vrtání se považuje za komplexní proces, u kterého nastává lisování kovu středem břitu vrtáku a obrábění řeznými hranami nástroje. Vysoká pevnost a houževnatost zapříčiňují výrazné potíže při vrtání a pevnost i houževnatost si tyto materiály zachovávají i za vysokých teplot. Na to navazuje další problém, a to že se zvětšující se hloubkou vrtání se výrazně zhoršuje přívod chladicí kapaliny do místa řezu a na to dále navazuje oddělování třísky řeznými hranami nástroje. Nezvládnutí správné technologie vrtání může velmi rychle vést ke zničení nástroje. Doporučují se zkrácené vrtáky. [4]

1.3.Měření tvrdosti

Hodnota tvrdosti patří mezi velmi důležité charakteristiky materiálu. Tvrdost, jako materiálově-fyzikální vlastnost je všeobecně definována, jako odpor materiálu proti vniknutí

cizího, tvrdšího tělesa do měřeného materiálu. Hodnota tvrdosti udává obraz o odolnosti materiálu proti opotřebení, dále o jeho opracovatelnosti, o stavu tepelného zpracování atd. [22]

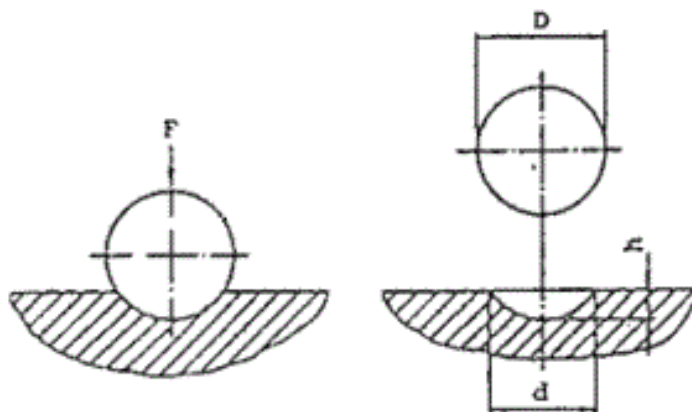
Metody měření se dělí podle způsobu zatěžující síly na statické a dynamické. Když se při zkoušce tvrdosti vytváří ve zkoušeném materiálu vtisk o velikosti řádově několik desetin milimetru až několik milimetrů, jde o makrotvrdost. Pokud je měřena tvrdost jednotlivých strukturních složek, velmi malých povrchů zkoušeného materiálu, pak jde o mikrotvrdost. Nejpoužívanější je statická metoda vnikací a to pro její dobré uplatnění v praxi. Vnikací tělísko, nebo-li indenter se vyznačuje přesně stanoveným tvarem a velikostí a je navrženo z materiálu, který je dostatečně tvrdý. Zkouška se provádí pomocí zařízení, které umožňuje vtlačit vnikací těleso přesně stanovenou zatěžující silou do testovaného vzorku. Výsledná deformace je ukazatelem tvrdosti. Méně používané jsou metody odrazové, které z hlediska jejich charakteru můžeme zařadit mezi dynamické zkoušky. [28]

Vzhledem k tomu, že se používají odlišné metody měření, tvrdost je závislá na celé řadě faktorů a není ji možné považovat za fyzikální veličinu. Ovšem vzhledem na reprodukovatelnost měření je nutné do vztahů dosadit pokaždé jednotlivé veličiny o síle [N] a o ploše [mm²]. Tvrdost je posuzována podle míry deformace při působení stálého zatížení, nebo míry zatížení potřebného k vytvoření deformace. Mezi nejpoužívanější metody patří statické zkoušky podle Vickerse, Rockwella, Brinella a mezi dynamické zkouška pomocí Poldiho kladívka. V menší míře jsou využívány statické zkoušky podle Knoop a dynamická Shoreho metoda. [16] [28]

1.3.1. Zkouška tvrdosti podle Brinella

Je to vnikací zkouška, jejíž princip závisí na vtlačení indenteru do povrchu zkušebního materiálu. Vynálezcem této metody je Jonah August Brinell ze Švédska a oficiálně byla uvedena v roce 1900 v Paříži. V dnešní podobě zkouška spadá pod normu ČSN EN ISO 6506. Vnikací těleso je ve tvaru kuličky a to v průměrech D 1; 2; 2,5; 5 a 10 mm. Pro méně tvrdé materiály se používá kulička s tvrdostí do 450 HB, která je zhotovena ze zakalené oceli a pro tvrdší materiály vyhovuje kulička ze slinutého karbidu s hraniční tvrdostí do 650 HB. Podle toho se rozděluje označení Brinellovy tvrdosti na HBS a HBW. HBS se udává při požití kalené ocelové kuličky a HBW se uvádí u měření za pomoci kuličky ze slinutého karbidu. Za naměřenou hodnotou tvrdosti se udává již zmíněné označení HBS nebo HBW a dále následuje index, který poukazuje na podmínky zkoušky. Jako příklad si uvedeme

210 HBW 2/600, kde 210 je hodnota tvrdosti, 2 je průměr vtiskávací kuličky v milimetrech a 600 značí zkušební zatížení 5 884,2 N. [10] [22]



Obr. 1.4 Znázornění zkoušky dle Brinella [3]

Předpoklady zkoušky: [10] [31]

- vhodná příprava povrchu zkoušeného vzorku
- doba náběhu zatěžující síly od počátku po konečnou hodnotu je 2 až 8 sekund
- doba působení plného zatížení je 10 až 15 sekund
- zkušební zatížení se pohybuje na intervalu od 9,807 N do 29 420 N
- vzdálenost mezi středy dvou sousedících vtisků je minimálně 4d
- vzdálenost mezi středem vtisku a hranou zkoušeného materiálu je 2,5d
- zkušební zatížení je voleno tak, že průměr vtisku d je v intervalu hodnot 0,24D až 0,6D

Vztah pro výpočet tvrdosti podle Brinella: [21]

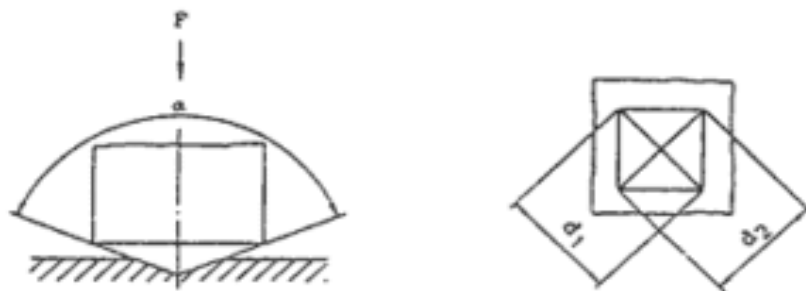
$$HB = 0,102 \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

1.3.2. Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tato metoda spatřila světlo světa roku 1922 v Anglii a jejími vynálezci byli R. L. Smith a G. E. Sandland. Je na podobné bázi jako Brinellova zkouška. Základ zkoušky závisí na vtlačení pravidelného, diamantového, čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem protilehlých stěn $136^\circ \pm 0,5^\circ$ do povrchu zkoušeného materiálu zatěžující silou, která působí kolmo k tělesu po určenou dobu. Dalším krokem je změření úhlopříček značené písmenem d, které jsou znázorněny na obrázku č. 1.5 stejně jako celý princip metody a vypočtení jejich

aritmetického průměru. Dále následuje dosazení do vztahu. Hodnota zmíněného úhlu je navržena tak, aby splňovala podmínky minimálního tření mezi indentorem a vzorkem. [10] [15]

Předností metody je aplikovatelnost na materiály o široké škále tvrdostí. Výhodou je také malá velikost vtisku po indentoru, což má za následek téměř nulové poškození měřeného vzorku, nebo součásti a tím pádem se tato metoda stává vhodnou pro kontrolu tvrdosti reálných dílců během výroby. Jako nevýhoda se jeví požadavek na vysokou kvalitu povrchu zkoušeného materiálu. Mezi zkoušené materiály by neměly patřit ty, které mají heterogenní a hrubozrnnou strukturu z důvodu možnosti vpichu do zrna fáze. Toto měření by mohlo být zkreslené. U nás je zkouška popsána normou ČSN EN ISO 6507. [15] [21]



Obr. 1.5 Princip metody dle Vickerse [3]

Předpoklady zkoušky: [31] [10]

- vysoká kvalita zkoušeného povrchu
- zatížení v intervalu 9,807 N (1 kp) až 980 N (100 kp)
- doba náběhu zatěžující síly od počátku po konečnou hodnotu je 2 až 8 sekund
- čas působení zatížení je 10 až 15 sekund
- vzdálenost mezi dvěma sousedními vtisky musí být minimálně 2d
- zkoušený materiál musí mít tloušťku minimálně 2d
- během zkušebního zatěžování nesmí docházet k rázům nebo chvění
- zkouška by měla být prováděna při teplotách od 10 °C do 35 °C

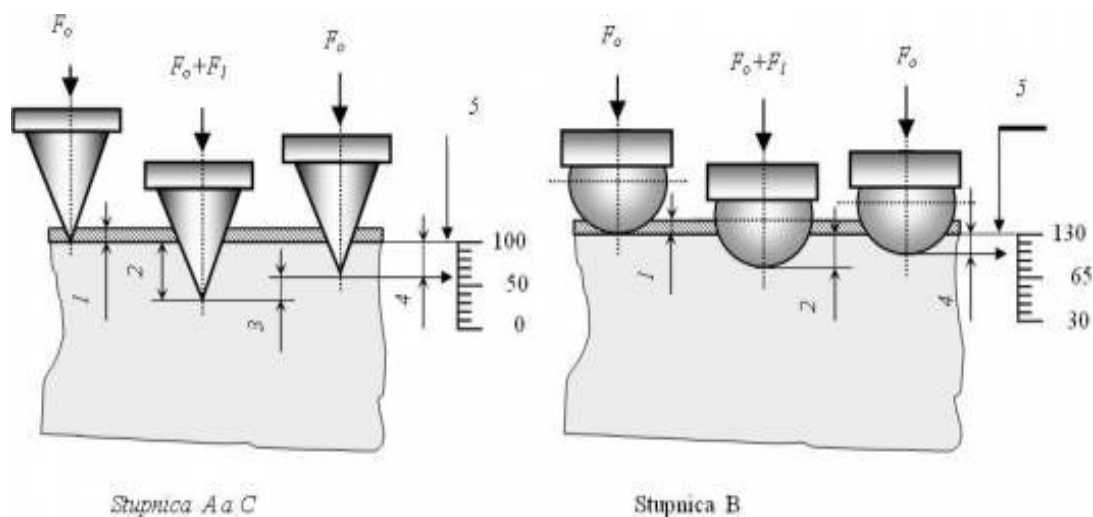
Vztah pro výpočet tvrdosti podle Vickerse: [21]

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{d_1 \cdot d_2}$$

1.3.3. Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Metoda je pojmenována po svém vynálezci S. P. Rockwellovi. Postup této metody je jiný oproti metodám podle Vickerse a Brinella. Jako vnikací těleso je možné zvolit diamantový kužel s vrcholovým úhlem $120^\circ \pm 0,5^\circ$ nebo kuličku, která může mít průměr $1/16''$ a nebo $1/8''$, přičemž každá z těchto variant má svoji vlastní stupnici. Stupnice jsou značeny písmeny A, B, C, E, F, G, H, K, N a T, přičemž mezi v praxi nejpoužívanější patří A, B a C. Zkouška A nebo C je provádí za pomoci diamantového kužele a zkouška B pomocí kuličky. Hodnotu tvrdosti je možné odečíst přímo ze stupnice měřicího zařízení. To dělá metodu velmi rychlou a snadnou. [31]

Postup měření tvrdosti podle Rockwella je znázorněna na obrázku č. 1.6, který je díky číslování rozdělen do pěti částí. Hloubka označená číslem jedna je způsobená předběžným zatížením F_0 . U dvojky je vidět hloubku vtisku zapříčiněnou vlivem celkového zatížení, což je součet předběžného zatížení F_0 a přídavného zatížení F_1 . V třetím kroku je vidět pružnou, elastickou část hloubky vtisku způsobenou celkovým zatížením. Stejně tak čtverka značí trvalou, plastickou hloubku vtisku h po skončení působení přídavného zatížení. A nakonec číslo pět značí základní rovinu měření vzdálenou od povrchu o hloubku vtisku od předběžného zatížení. Zkouška spadá pod normu ČSN EN ISO 6508. [9] [31]



Obr 1.6 Princip měření tvrdosti podle Rockwella [9]

Předpoklady zkoušky: [10] [31]

- předběžné zatížení F_0 je pro nejpoužívanější stupnice A, B a C 98,1 N
- vyhovující kvalita povrchu vzorku (hladký, rovný povrch)
- tloušťka vzorku musí být 10 krát větší, než-li je konečná hloubka vtisku

- nutno zaručit teplotu 10 °C až 35 °C
- měřicí proces musí probíhat bez chvění a rázů
- časový interval, po který musí působit hlavní zatížení je 2 až 8 sekund
- vzdálenost mezi vtisky musí být minimálně 4 krát větší, než průměr vtisku

1.3.4. Měření mikrotvrdomosti

Mezi zkouškami mikrotvrdomosti a statickými zkouškami makrotvrdomosti není velký rozdíl. Liší se hlavně v intenzitě zatěžující síly. Zatím co zkoušky makrotvrdomosti podle Vickerse se provádí při zatížení 10 až 1200 N, při měření mikrotvrdomosti je použito zatížení, které je menší než 10 N. Poprvé bylo takové měření zaznamenáno ve Velké Británii v roce 1932. [28]

K nejpoužívanějším metodám měření mikrotvrdomosti patří metoda podle Vickerse. Byla vyvinutá jako alternativa k Brinellově metodě. Ihned po vyvinutí této metody se stala velmi používanou hlavně díky její dobré přesnosti a reprodukovatelnosti. Další podstatné výhody jsou např. dosti malý vtisk, změření všech stupňů tvrdosti, možnost změřit i velmi tenké plechy. Naopak nevýhody jsou nutnost výborné přípravy povrchu a velmi přesné odměření rozměrů vtisku. Norma je podrobně popsána v normě ČSN EN ISO 6507 – 1. [2]

Tab. 2 Rozdělení Vickersových zkoušek tvrdosti [22]

Popis	Označení zatížení	Zkušební zatížení [N]
Zkouška makrotvrdomosti	$\geq \text{HV } 5$	$F \geq 49,03$
Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení	$\text{HV } 0,2 - < \text{HV } 5$	$1,961 \leq F < 49,03$
Zkouška mikrotvrdomosti	$\text{HV } 0,01 - < \text{HV } 0,2$	$0,09807 \leq F < 1,961$

Tab. 3 Hodnoty zkušebních zatížení podle Vickerse a jejich značení [26]

Název zkoušky	Označení zatížení	Velikost zkušebního zatížení F [N]
Zkouška mikrotvrdosti	HV 0,01	0,09807
	HV 0,015	0,1471
	HV 0,02	0,1961
	HV 0,025	0,2942
	HV 0,05	0,4903
	HV 0,1	0,9807
Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení	HV 0,2	1,961
	HV 0,3	2,942
	HV 0,5	4,903
	HV 1	9,807
	HV 2	19,61
	HV 3	29,42

1.3.5. Přenosné tvrdoměry

Samozřejmostí je, že i pro měření přenosnými tvrdoměry v provozních podmínkách musí být zajištěná optimální drsnost a čistota měřeného místa (broušený, resp. leštěný povrch, zbavený nečistot, prachu a mastnoty). Je potřeba brát v potaz i vliv zbytkových magnetických polí, směr měření, stabilitu měřicí sondy při ručním měření a druh měřeného materiálu.

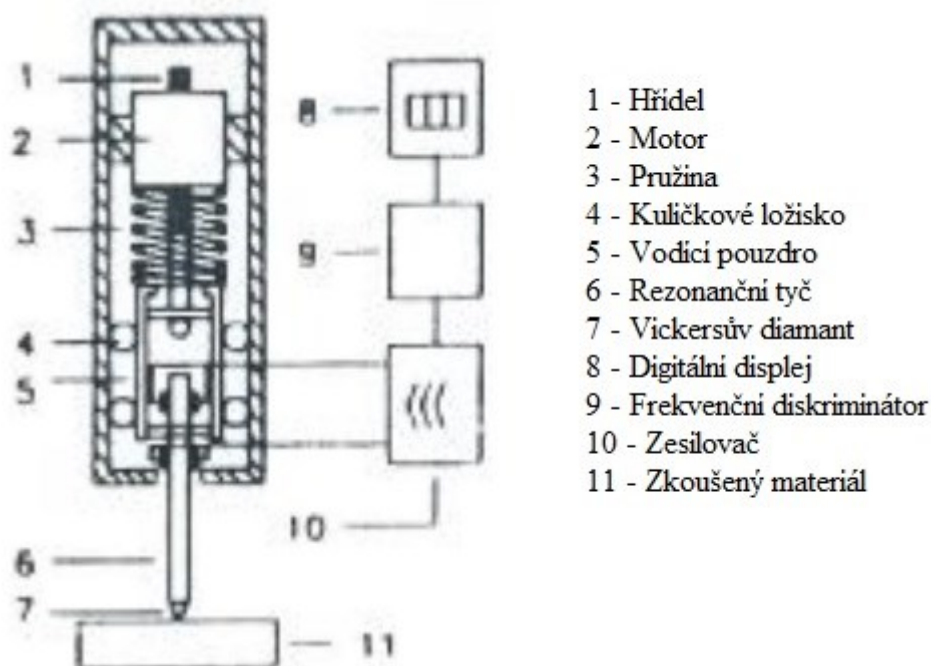
Při volbě vhodného měřicího přístroje k provoznímu měření se musí brát zřetel na přístup k měřeným místům, velikosti a hmotnosti měřené součásti a ekonomické zhodnocení vstupních nákladů (provozní náklady jsou minimální). Po konstrukční stránce musí být přístroje odolné proti nárazům, vlhkosti a prachu. U přístrojů je nutná hmotnostní a rozměrová přijatelnost. Pro uživatele je konstrukčně přívětivější tvrdoměr se samostatnou měřicí sondou a samostatnou vyhodnocovací a zobrazovací částí. Nutnost je dobrá čitelnost údajů z displeje při snížené viditelnosti. [16]

V dnešní době je možné si vybrat z celé řady přístrojů na měření tvrdosti materiálů statickou nebo dynamickou metodou.

1.3.5.1. Přístroje používající statickou metodu měření tvrdosti

Nejmodernější přenosné přístroje na měření tvrdosti měří metodou UCI (Ultrasonic Contact Impedance). Tyto přístroje mohou pracovat ve velkém měřicím rozsahu. Tento rozsah se pohybuje zhruba v rozmezí 20 – 1740 HV.

Metoda UCI, která byla patentovaná v roce 1961, se zakládá na principu závislosti změny vlastní rezonanční frekvence sondy od velikosti plochy vtisku ve zkoušeném materiálu. Zkušební sonda má na svém konci diamantový jehlan podle Vickerse a je vtlačována standartní silou do povrchu materiálu. Hloubka vtisku jehlanu do materiálu a tím i kontaktní plocha sonda – materiál, je úměrná změně rezonanční frekvence rezonátoru sondy. [16]



Obr. 1.7 Schéma přenosného tvrdoměru pracující metodou UCI [16]

Rezonátor s vickersovým diamantem je pomocí piezoelektrického efektu donucený k oscilaci v podélném směru. Při elastické vazbě tohoto systému s hmotou zkoušeného materiálu vzniká posun rezonanční frekvence k vyšším hodnotám, protože na kmitající systém působí dodatečná zpětná síla. Velikost této síly je závislá na kontaktní ploše A mezi vnikajícím tělesem a zkoušeným materiálem a na elastických charakteristikách materiálu a rezonátoru.

Vztah pro výpočet dodatečné zpětné síly: [16]

$$\Delta f = f(A, E_d, \nu_d, E_p, \nu_p, f_0)$$

Při zanedbání tlumicího efektu a reaktance zkoušeného materiálu je možné ukázat, že kontaktní plocha A je výsledkem součinu dvou funkcí g a h . Vztah pro výpočet kontaktní plochy A : [16]

$$A = g(E_d, \nu_d, E_p, \nu_p) \cdot h\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)$$

Měřením E_d , ν_d , E_p , ν_p , Δf a f_0 se může vypočítat hodnota A . Hodnota Vickersové tvrdosti je potom dána vztahem: [16]

$$HV = \frac{F}{A}$$

Protože elastické moduly a Poissonovo číslo jsou často neznámé a těžko změřitelné, může být hodnota materiálových konstant stanovena na porovnávací měrce se známou tvrdostí. V tom případě je možné měřit tvrdost materiálů, jejichž elastické konstanty jsou jen málo odlišné od hodnot porovnávací měrky. Pro měření tvrdosti HV jsou potřebné jen hodnoty Δf a f_0 . Pokud se všechny potřebné veličiny měří při standardní přitlačné síle, anuluje se vliv pružnosti materiálu. U nelegovaných a nízkolegovaných ocelí jsou změny Poissonova čísla a modul pružnosti měřeného materiálu malé. Proto mohou být tyto přístroje předkalibrované na tyto materiály. To má za důsledek automaticky měřit tvrdost s dostatečnou přesností i bez porovnávacích měrek. [16]

1.3.5.2. Přístroje používající dynamickou metodu měření tvrdosti

Jak vyplývá z technické podstaty dynamické metody, přístroje zabezpečují jednak vrhnutí zkušebního tělíska na měřený povrch materiálu, tak i měření a vyhodnocování dopadové a odrazové rychlosti. Mechanická část přístroje je oddělená od vyhodnocovací a zobrazovací jednotky. Díky tomu je možné k jedné základní jednotce připojit více rázových jednotek a tím pokrýt širší rozsah tvrdosti. Nejmodernější přístroje mají ovšem obě jednotky integrované do jednoho celku, což zvyšuje variabilitu použití přístroje v různých podmínkách. [16]

1.4. Vliv obrábění na změnu tvrdosti

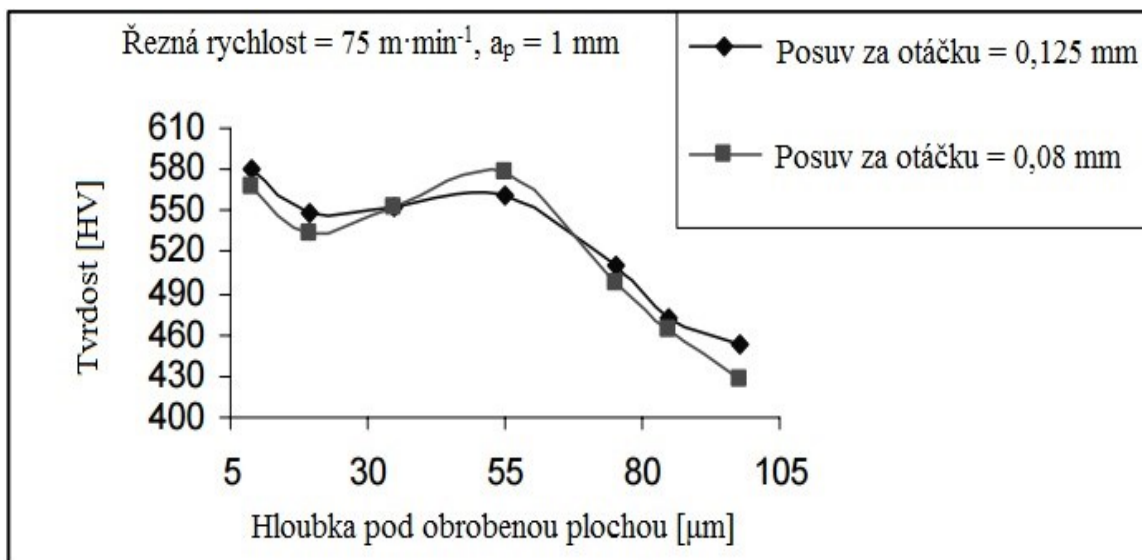
Řezný proces zapříčiňuje změny v povrchových vrstvách obráběných materiálů a to pomocí fyzikálních, mechanických i chemických procesů. Plastická deformace je iniciátorem vytvrzování povrchů, což lze jinak pochopit tak, že proti pohybu dislokací klade vyšší odpor krystalická struktura kovových materiálů. Pod vrstvou materiálu, jenž byla obráběním odebrána se do hloubky dostává určitá intenzita zpevnění. Díky novým technologiím, jako je např. vysokorychlostní obrábění se vytvrzování svrchní vrstvy materiálu po obrobení mírně eliminuje. Důvod této eliminace je užší zóna plastické primární deformace. Ta se zaměřuje převážně na odchod třísky. Následkem je nižší hloubka zpevnění. Zaměříme-li se na řeznou rychlost, tak s jejím stoupáním se snižují hodnoty tvrdosti i hloubky působení tohoto jevu. [1]

Podmínky deformace a vlastnosti materiálu jsou stěžejní, protože s nimi je nejvíce spojeno zpevnění povrchové vrstvy po obrobení. Tento jev zpevnění můžeme nejvíce sledovat u materiálů s nižší počáteční pevností. Mezi tyto materiály patří např. korozivzdorná austenitická ocel. Se zpevněním povrchu materiálu po obrobení je spojena nemalá řada negativních účinků. Tím je myšlena třeba trvanlivost nástrojů, tvorba trhlin a prasklinek na povrchu materiálu, nebo zbytkové napětí a rekrytalizace, což můžeme zahrnout pod metalurgické poškození. [1] [25]

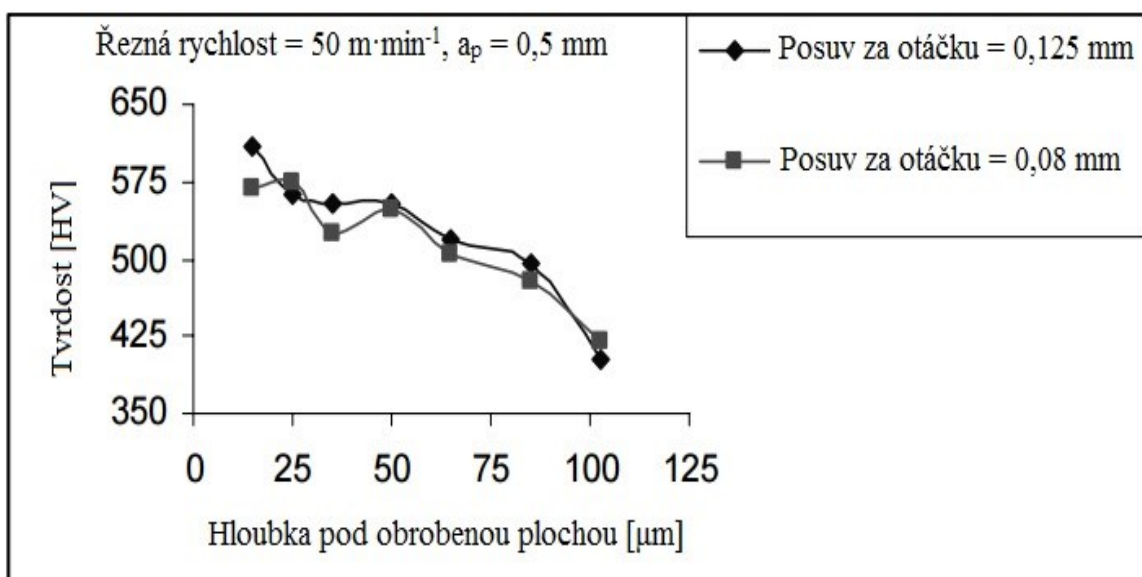
Naopak za klad se dá považovat zlepšení mechanických vlastností materiálu, které přispívají k zábraně lomu v únavě třeba u strojních součástí. V některých případech dokončovacích operací dochází k celkovému zlepšení mechanických i funkčních vlastností povrchu a to k odolnosti vůči abrazi, korozi, opotřebení. Ke tvorbě toho jevu zpevnění dochází následovně. Je nutné si uvědomit, že reálné ostří nástroje netvoří přímo úsečka, nýbrž je to část válcové plochy s jasně daným poloměrem. Tím pádem dochází při obrábění mezi obrobkem a obráběným materiálem k negativnímu úhlu čela. To má za následek nejen řezání obráběného materiálu, ale také jeho tváření. [1]

1.4.1. Ukázka vlivu obrábění na tvrdost pro materiál Inconel 718

Na obrázcích č. 1.8 a 1.9 můžeme vidět graf závislosti tvrdosti na hloubce obrobené vrstvy materiálu Inconel 718. V obou dvou grafech jsou dvě křivky, přičemž jedna znázorňuje obrobení při posuvu na otáčku 0,125 mm a druhá 0,08 mm. Na obrázku č. 1.8 je použita řezná rychlost $75 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a hloubka záběru třísky je 1 mm. Na obrázku 1.9 je použita řezná rychlost $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a hloubka záběru třísky je 0,5 mm.



Obr. 1.8 Závislost tvrdosti na hĺoubce obrobenu vrstvy materiálu Inconel 718 za daných řezných podmínek [19]



Obr. 1.9 Závislost tvrdosti na hĺoubce obrobenu vrstvy materiálu Inconel 718 za daných řezných podmínek [19]

Po prozkoumání těchto dvou grafů je zjevné, v jakých hĺoubkách se vytvrzení povrchové vrstvy materiálu vlivem obrábění projevuje. Rozdíly jsou až 200 HV na $100 \mu\text{m}$.

1.5. Analytické a statistické nástroje Six Sigma

Od poloviny 20. století došlo k velkému zvýšení sériové výroby a to zapříčinilo navýšení požadavků na výkonnost procesů. Jedna z metod, která se osvědčila je metoda Six Sigma vyvinutá společností Motorola. [14]

Základní úkol metody Six Sigma je vylepšení procesů v podnicích pomocí redukce variability, která značí proměnlivost daných procesů vlivem počtu nahodilých i jasně určených faktorů. Cílem je dosáhnout stability v každé fázi výrobku, ať už od zadání požadavku na jeho výrobu až po jeho vyřazení. Priorita pro docílení potřebné stability je minimalizace závad jistých výrobků a odchylek od potřebné kvality parametru výrobku. Sigma, jakožto písmeno z řecké abecedy vyjadřuje směrodatnou odchylku jako míru variability charakteristik produktů. Stupeň preciznosti procesu je dán nejvyšším počtem chyb na milion pokusů. Pro maximální stupeň by výsledná hodnota neměla přesahovat 3,4 chyb. [20]

Tab. 4 Efektivita a počet neshod na úrovních Six Sigma [20]

Úroveň kvality sigma	Počet vad na milion příležitostí k vadě	Efektivita [%]
One Sigma	690 000	31
Two Sigma	308 000	69,2
Three Sigma	66 800	93,32
Four Sigma	6 210	99,379
Five Sigma	230	99,977
Six Sigma	3,4	99,9997

1.5.1. Analýza systému měření MSA (Measurement System Analysis)

Mezi důležité nástroje Six Sigma patří analýza systému měření, dále jen MSA. MSA se zaměřuje na porozumění procesu měření, přičemž se posoudí velikost chyby a vhodnost systému měření. Systém měření se dá považovat jako soubor operací, postupů, měřidel a dalšího vybavení, které se používá k přiřazení čísla zjišťované charakteristiky. Jde o kompletní proces, který se používá pro získání výsledků měření. [14]

Měřidlo je jakýkoliv prostředek použitelný pro získání údajů. Často se tento termín vztahuje pro prostředky používané na dílně. Zahrnujeme zde i kalibry.

Proces měření slouží pro rozhodování o procesu, který chceme řídit. Vlastník výrobního procesu chce učinit správná rozhodnutí s minimální námahou.

Souhrnný důsledek všech zdrojů variability nazýváme chybou systému, nebo zkráceně chybou. Při řízení produktu může variabilita systému měření mít za následek to, že dobrý díl bude označen jako špatný, nebo že špatný díl bude označen jako dobrý. Při řízení procesu bude mít variabilita systému měření obdobné důsledky (označení náhodné příčiny za zvláštní nebo označení zvláštní příčiny jako náhodné). [14]

Pro praxi se nejvíce používají dva různé ukazatele, opakovatelnost a reprodukovatelnost. Jinak řečeno R plus R měřidla. Nejsou zde totiž nezbytné hluboké znalosti statistiky jako v případě některých jiných ukazatelů.

Opakovatelnost (Repetability) je variabilita výsledků měření, které získáme jedním měřicím přístrojem. Tento přístroj byl použit jedním pracovníkem pro opakované měření stejných charakteristik na stejném výrobku. Také se jí říká inherentní přesnost měřicího přístroje. [20]

Reprodukovatelnost (Reproducibility) je variabilita průměrů měření požadovaných prováděných různými pracovníky, kteří používají stejné měřidlo pro měření stejné charakteristiky na stejném výrobku. Jde o variabilitu systému měření, která je způsobená rozdílností (chování) hodnotitelů. [20]

Hodnoty ukazatelů R plus R a dalších se vypočítají různými metodami, kde jsou dané postupy i pro velikost (počet) vzorku: [20]

- Metoda rozpětí vypočítává pouze hodnotu R plus R, minimální velikost vzorku je 5 kusů výrobku a dva hodnotitelé měří každý výrobek jednou.
- Metoda průměru a rozpětí vypočítává všechny ukazatele kromě interakce, minimální velikost vzorku je 10, 3 hodnotitelé a každý z nich opakuje měření dvakrát.
- Metoda ANOVA vypočítává všechny ukazatele včetně interakce, minimální velikost vzorku je 10, 3 hodnotitelé a každý z nich opakuje měření dvakrát

Systém měření je způsobilý pro určení, zda je produkt uvnitř specifikací, poněvadž R plus R systému měření musí být nízké vzhledem k toleranci (menší než 10 %). Obecně tedy platí: [20]

- $R \text{ plus } R < 10 \%$, systém měření vyhovuje
- $10 \% \leq R \text{ plus } R \leq 30 \%$, systém měření může být vyhovující, ale může záležet na konkrétní aplikaci
- $R \text{ plus } R > 30 \%$, systém měření se nesmí používat

2. Experimentální část

První experimentální část se zabývá kalibrací přenosného tvrdoměru, který zakoupila firma Honewell Aerospace Olomouc s.r.o. a zjištěním, zda jeho přesnost bude vyhovovat použití v provozních podmínkách. Toto měření má napomoci rozhodnutí, zda bude výhodné koupit více přenosných tvrdoměrů a začlenit je do provozu firmy.

Druhá část se bude věnovat měření tvrdosti reálných dílců, které jsou obrobeny za různých řezných podmínek. Měření bude provedeno pomocí kalibrovaného přenosného tvrdoměru. Výsledné hodnoty poslouží k zjištění vlivu parametrů obrábění na profil tvrdosti materiálu Inconel 718.

2.1. Měřicí nástroj

Jako měřicí přístroj byl zakoupen přenosný tvrdoměr SonoDur2, který pracuje na principu metody UCI, jenž je podrobně popsána v teoretické části. Ve stručnosti měření tvrdosti UCI metodou se hodnotí vtisk Vickersova diamantového vnikacího tělíska s okamžitým digitálním zobrazením. Zatížení je aplikováno motoricky nebo ručně pomocí pružiny. Hodnocení tvrdosti je v závislosti na použité síle a ploše vtisku při zatížení.

Na obrázku č. 2.1 jsou stručně popsány hlavní části přístroje.



Obr. 2.1 Zobrazení použitého přenosného tvrdoměru

V následující tabulce jsou uvedeny přípustné limitní odchylky přístroje udávané výrobcem pro celou škálu tvrdosti a stupnice tvrdosti, kterými je tvrdoměr schopen měřit.

Tab. 5 Přístupné odchylky pro naměřené hodnoty

Stupnice tvrdosti	Limitní odchylka [%]			
	< 250 HV	250 HV - 500 HV	500 HV - 800 HV	> 800 HV
HV 0,1	6	7	8	9
HV 0,3	6	7	8	9
HV 0,8	5	5	6	7
HV 1	5	5	6	7
HV 5	5	5	5	5
HV 10	5	5	5	5

K příslušenství přístroje patří stojan (přípravek), do kterého se může pevně uchytit měřicí sonda. Tento stojan dále umožní pohyb sondy pouze ve vertikálním směru, čímž by se měla zajistit větší přesnost měření. Nevýhodou je malá variabilita stojanu, takže jej můžeme použít jen pro měření méně rozměrných vzorku.

2.2. Návrh a provedení experimentu

2.2.1. Měření na kalibračních destičkách

Všechna měření budou provedena zkušebním zatížením HV 1. Jako první se kalibruje přenosný tvrdoměr SonoDur2 pomocí tvrdoměrných destiček. Jsou použity celkem 3 destičky. Tvrdosti tvrdoměrných destiček jsou zobrazeny v tabulce č. 6. Měření se provádí třemi měřiteli, přičemž pro jedno měření se naměří 5 hodnot, z kterých se vypočte průměr. Každý měřitel provede v případě první a druhé destičky 4 měření, z toho dvě ručně a dvě s pomocí přípravku. V případě třetí destičky provede každý měřitel pouze dvě měření. Jedno ručně a druhé s přípravkem.

Tab. 6 Tvrdost použitých tvrdoměrných destiček

Označení destičky	Tvrdost		
	[HRC]	[HV]	[HB]
Destička 1	32,8 ± 0,4	325 ± 4	304
Destička 2	31,7 ± 0,4	315 ± 3	296
Destička 3	13	202 ± 2	198 ± 2,1



Obr. 2.2 Ukázka tvrdoměrné destičky

V následujících tabulkách je zobrazen průběh měření kalibračních destiček přenosným tvrdoměrem. Sloupec Volně/S přípravkem značí, jestli je měření prováděno se sondou drženou v ruce měřitele, nebo jestli je sonda upevněna ve stojanu. Kalibrační hodnota udává hodnotu tvrdosti tvrdoměrné destičky v daných jednotkách. Sloupce Min a Max značí nejnížší a nejvyšší naměřenou hodnotu. Sloupec R značí rozptyl naměřených hodnot, což je rozdíl mezi Min a Max a $R [\%]$ značí tento rozptyl v procentech vůči průměru naměřených hodnot. Ve sloupci E je rozdíl mezi průměrem naměřených hodnot a kalibrační hodnotou. V následujícím sloupci $E [\%]$ je hodnota E vyjádřená v procentech vůči kalibrační hodnotě, dále jen jako chyba měření. Kritická hodnota chyby měření je stanovena nad 10 %. Hodnotu σ , jenž je definována jako střední odchylka jednotlivého měření zobrazuje po sérii měření měřicí přístroj. Pro námi zvolené zkušební zatížení HV1 by tato odchylka neměla přesahovat 7 %.

Tab. 7 Měření první kalibrační destičky

Měřitel	Jednotky	Volně / S přípravkem	Kalibrační hodnota	Číslo měření					Průměr naměřených hodnot	Min	Max	R	R [%]	E	E [%]	σ	σ [%]
				1	2	3	4	5									
1. měřitel	HV	volně	325	353	378	340	360	316	349,4	316	378	62	17,7%	24,4	7,5%	23,0	6,7%
	HV	přípravek	325	339	369	354	300	299	332,2	299	369	70	21,1%	7,2	2,2%	32,0	9,5%
	HRC	volně	32,8	29,5	35	34,5	34	34,6	33,56	29,5	35	5,5	16,4%	0,8	2,3%	2,3	3,4%
	HRC	přípravek	32,8	35,1	34,6	36,2	31	37,1	34,88	31,4	37,1	5,7	16,3%	2,1	6,3%	2,2	3,4%
2. měřitel	HV	volně	325	372	394	336	340	296	347,6	296	394	98	28,2%	22,6	7,0%	37,0	9,9%
	HV	přípravek	325	339	369	354	300	299	332,2	299	369	70	21,1%	7,2	2,2%	32,0	9,5%
	HRC	volně	32,8	35,7	37,1	33,7	35	35	35,3	33,7	37,1	3,4	9,6%	2,5	7,6%	1,3	1,9%
	HRC	přípravek	32,8	35,5	37,4	37,2	34	30,9	35,06	30,9	37,4	6,5	18,5%	2,3	6,9%	2,6	4,1%
3. měřitel	HV	volně	325	331	355	341	340	290	331,4	290	355	65	19,6%	6,4	2,0%	25,0	7,4%
	HV	přípravek	325	364	310	357	345	345	344,2	310	364	54	15,7%	19,2	5,9%	20,0	5,9%
	HRC	volně	32,8	37,5	36,7	34,7	30	37,6	35,2	29,5	37,6	8,1	23,0%	2,4	7,3%	3,4	5,3%
	HRC	přípravek	32,8	35,4	35,2	34,8	36	34,6	35,12	34,6	35,6	1	2,8%	2,3	7,1%	0,4	0,6%

Tab. 8 Měření druhé kalibrační destičky

Měřitel	Jednotky	Volně / S přípravkem	Kalibrační hodnota	Číslo měření					Průměr naměřených hodnot	Min	Max	R	R [%]	E	E [%]	σ	σ [%]
				1	2	3	4	5									
1. měřitel	HV	volně	315	335	332	358	297	337	331,8	297	358	61	18,4%	16,8	5,3%	22	6,7%
	HV	přípravek	315	345	337	356	340	306	336,8	306	356	50	14,8%	21,8	6,9%	19	5,5%
	HRC	volně	31,7	33	34	34,8	33,1	33,7	33,7	32,8	34,8	2	5,9%	2,0	6,4%	0,8	1,2%
	HRC	přípravek	31,7	36	35	33	30,4	29,7	32,6	29,7	35,6	5,9	18,1%	0,9	3,0%	2,5	3,8%
2. měřitel	HV	volně	315	344	331	297	307	341	324,0	297	344	47	14,5%	9,0	2,9%	21	6,6%
	HV	přípravek	315	333	356	340	344	338	342,2	333	356	23	6,7%	27,2	8,6%	9	2,5%
	HRC	volně	31,7	34	33	35,8	35,8	36	34,9	33	36	3	8,6%	3,2	10,0%	1,4	2,2%
	HRC	přípravek	31,7	31	34	34,6	34,2	29,3	32,6	29,3	34,6	5,3	16,3%	0,9	2,8%	2,5	3,7%
3. měřitel	HV	volně	315	294	337	337	328	334	326,0	294	337	43	13,2%	11,0	3,5%	18	5,6%
	HV	přípravek	315	368	335	336	303	351	338,6	303	368	65	19,2%	23,6	7,5%	24	7,1%
	HRC	volně	31,7	31	33	32,6	30,5	32,9	31,9	30,5	32,9	2,4	7,5%	0,2	0,6%	1,1	1,6%
	HRC	přípravek	31,7	36	34	34,8	33,2	29,4	33,4	29,4	35,7	6,3	18,9%	1,7	5,3%	2,4	3,6%

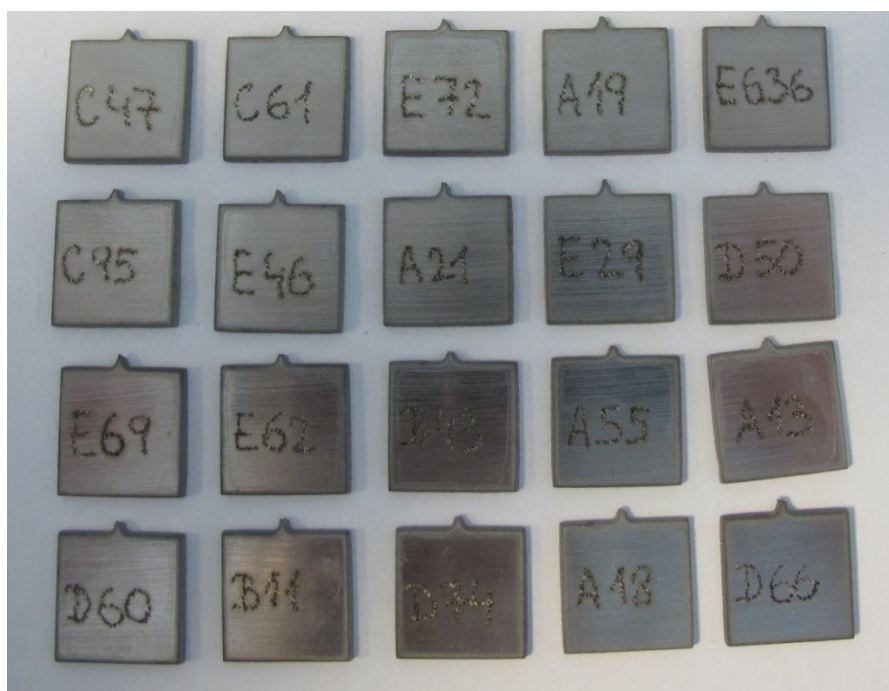
Tab. 9 Měření třetí kalibrační destičky

Měřitel	Jednotky	Volně / S přípravkem	Kalibrační hodnota	Číslo měření					Průměr naměřených hodnot	Min	Max	R	R [%]	E	E [%]	σ	σ [%]
				1	2	3	4	5									
1. měřitel	HV	volně	202	195	239	200	240	251	225	195	251	56	24,9%	23	11,4%	26	11,5%
	HV	přípravek	202	227	233	234	234	230	231,6	227	234	7	3,0%	30	14,7%	3	1,3%
2. měřitel	HV	volně	202	247	247	236	220	240	238	220	247	27	11,3%	36	17,8%	11	4,6%
	HV	přípravek	202	239	244	237	234	230	236,8	230	244	14	5,9%	35	17,2%	5	2,1%
3. měřitel	HV	volně	202	224	216	229	228	225	224,4	216	229	13	5,8%	22	11,1%	5	2,4%
	HV	přípravek	202	233	230	217	222	236	227,6	217	236	19	8,3%	26	12,7%	8	3,5%

Jak je vidět, v šesti případech měření se hodnota σ dostala před 7 %, což je nežádoucí. Chyba měření přesahuje kritickou hranici 10 % také v šesti případech a to pouze u měření třetí tvrdoměrné destičky.

2.2.2. Měření vzorků z materiálu Inconel 718 a provedení MSA

Je vybráno 10 vytvrzených a 10 nevytvrzených vzorků z materiálu Inconel 718. Tyto vzorky mají velikost 1,5x1,5 cm a jsou náhodně označeny, tak aby byly pro měřitele nerozeznatelné.



Obr. 2.3 Ukázka vzorků pro experiment MSA

Vzorky se nejprve podrobí měření v laboratoři na stacionárním tvrdoměru Buehler při zkušebním zatížení HV1, který je možno vidět na obrázku č. 2.4. Tvrdoměr je kalibrován každý den odbornými pracovníky. Měřený vzorek je podložen korozivzdornou podložkou kvůli přesnosti měření. Každý vzorek je měřen celkově pětkrát. Průběh i rozptyl měření je zaznamenán v tabulkách 10 a 11.



Obr. 2.4 Stacionární tvrdoměr Buehler

Tab. 10 Průběh měření nevytvrzených vzorků

Označení vzorku	Číslo měření					Průměr naměřených hodnot	Min	Max	R	R [%]
	1	2	3	4	5					
E69	383	381	377	370	392	381	370	392	22	5,8%
E62	382	373	395	389	411	390	373	411	38	9,7%
B43	386	389	395	392	391	391	386	395	9	2,3%
A55	400	401	384	384	391	392	384	401	17	4,3%
A13	376	389	392	391	395	389	376	395	19	4,9%
D60	383	373	387	369	385	379	369	387	18	4,7%
B11	354	335	367	363	376	359	335	376	41	11,4%
D74	406	397	379	394	380	391	379	406	27	6,9%
A18	392	398	399	392	371	390	371	399	28	7,2%
D66	384	397	369	382	383	383	369	397	28	7,3%

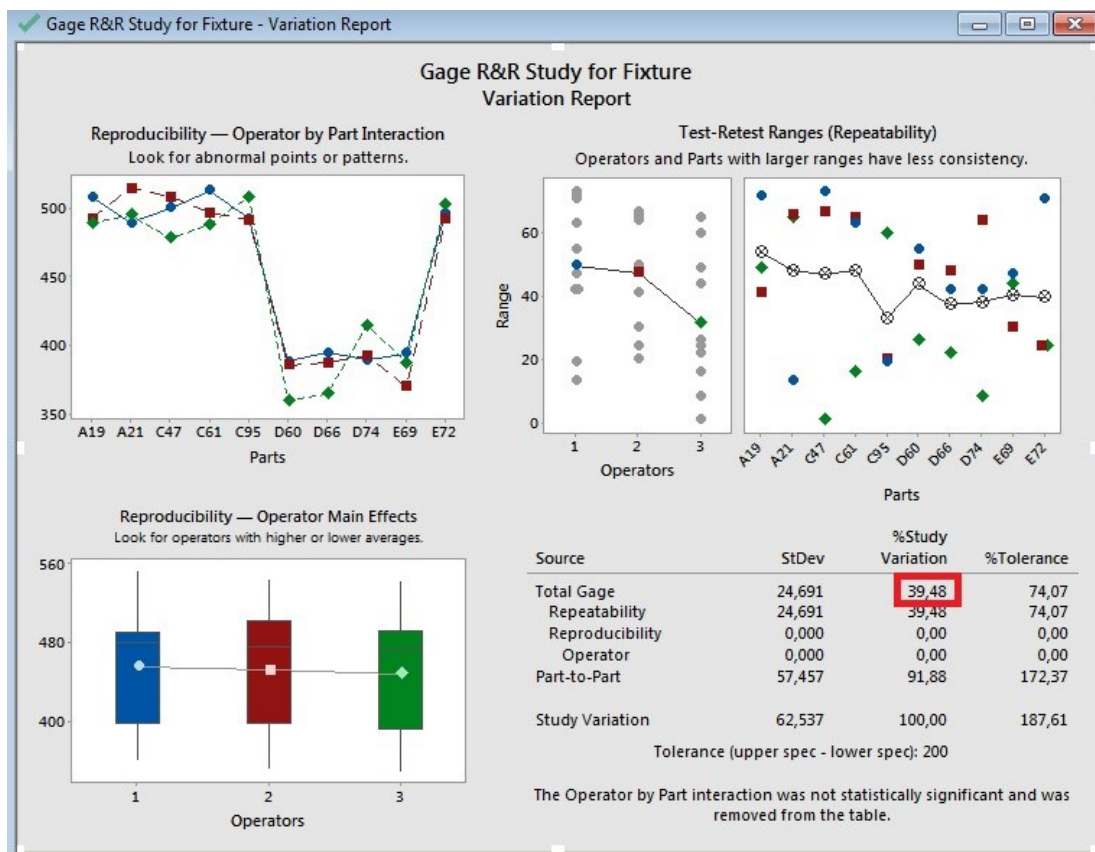
Tab. 11 Průběh měření vytvrzených vzorků

Označení vzorku	Číslo měření					Průměr naměřených hodnot	Min	Max	R	R [%]
	1	2	3	4	5					
C47	537	533	523	540	530	533	523	540	17	3,2%
C61	529	516	521	534	501	520	501	534	33	6,3%
E72	492	491	500	472	471	485	471	500	29	6,0%
A19	530	523	527	527	503	522	503	530	27	5,2%
E636	532	515	524	509	542	522	509	542	33	6,3%
C95	503	495	490	516	517	504	490	517	27	5,4%
E46	535	500	525	499	539	520	499	539	40	7,7%
A21	519	525	521	509	508	516	508	525	17	3,3%
E29	522	535	539	549	522	533	522	549	27	5,1%
D50	517	505	525	501	515	513	501	525	24	4,7%

Ze všech 20 vzorků je náhodně vybráno 10 a ty se budou dále měřit přenosným tvrdoměrem SonoDur2. Měření je prováděno podle předpokladů analýzy systému měření. Vzorky jsou měřeny v neuspořádaném pořadí tak, aby měřitelé neměli pojem, který kus právě měří. Ve výsledku je každý vzorek změřen třikrát, třemi měřiteli.

Naměřené hodnoty jsou vloženy do programu Minitab s tím, že ke každé naměřené hodnotě je přiřazeno označení vzorku a informace o tom, který měřitel vzorek měřil. Výstup programu Minitab je zobrazen na obrázku č. 2.4. Prioritou je hodnota ukazatele R plus R, jenž je zvýrazněna v červeném obdelníku. Tato hodnota představuje toleranci spotřebovanou nedostatkem opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Hodnota je vyšší než 30 %, což značí, že systém měření není dostatečně vyhovující.

Naměřené hodnoty jsou pro přehled zobrazeny v tabulce č. 12.



Obr. 2.4 Výstup programu Minitab

Tab. 12 Přehled naměřených hodnot pro MSA

Měřitel	VZOREK	Číslo měření			Průměr naměřených hodnot	Průměr naměřených hodnot v laboratoři	MIN	MAX	R	R [%]	E	E [%]
		1. měření	2. měření	3. měření								
1. měřitel	C47	544	471	485	500,0	533	471	544	73	14,6%	33,0	6,2%
	C61	490	553	495	512,7	520	490	553	63	12,3%	7,3	1,4%
	E72	480	540	469	496,3	485	469	540	71	14,3%	11,3	2,3%
	A19	553	481	490	508,0	522	481	553	72	14,2%	14,0	2,7%
	C95	490	484	503	492,3	504	484	503	19	3,9%	11,7	2,3%
	A21	496	488	483	489,0	516	483	496	13	2,7%	27,0	5,2%
	E69	416	397	369	394,0	381	369	416	47	11,9%	13,0	3,4%
	D60	386	362	417	388,3	379	362	417	55	14,2%	9,3	2,5%
	D74	367	391	409	389,0	391	367	409	42	10,8%	2,0	0,5%
	D66	413	371	400	394,7	383	371	413	42	10,6%	11,7	3,0%
2. měřitel	C47	477	503	544	508,0	533	477	544	67	13,2%	25,0	4,7%
	C61	470	485	535	496,7	520	470	535	65	13,1%	23,3	4,5%
	E72	505	481	490	492,0	485	481	505	24	4,9%	7,0	1,4%
	A19	472	492	513	492,3	522	472	513	41	8,3%	29,7	5,7%
	C95	484	485	504	491,0	504	484	504	20	4,1%	13,0	2,6%
	A21	542	476	525	514,3	516	476	542	66	12,8%	1,7	0,3%
	E69	359	389	361	369,7	381	359	389	30	8,1%	11,3	3,0%
	D60	404	354	398	385,3	379	354	404	50	13,0%	6,3	1,7%
	D74	407	417	353	392,3	391	353	417	64	16,3%	1,3	0,3%
	D66	398	358	406	387,3	383	358	406	48	12,4%	4,3	1,1%
3. měřitel	C47	478	479	478	478,3	533	478	479	1	0,2%	54,7	10,3%
	C61	495	479	491	488,3	520	479	495	16	3,3%	31,7	6,1%
	E72	501	492	516	503,0	485	492	516	24	4,8%	18,0	3,7%
	A19	471	477	520	489,3	522	471	520	49	10,0%	32,7	6,3%
	C95	484	485	504	491,0	504	484	504	20	4,1%	13,0	2,6%
	A21	474	538	473	495,0	516	473	538	65	13,1%	21,0	4,1%
	E69	360	398	404	387,3	381	360	404	44	11,4%	6,3	1,7%
	D60	354	376	350	360,0	379	350	376	26	7,2%	19,0	5,0%
	D74	409	417	417	414,3	391	409	417	8	1,9%	23,3	6,0%
	D66	361	355	377	364,3	383	355	377	22	6,0%	18,7	4,9%

Přestože ve sloupci, který znázorňuje chybu měření, přesahuje jen jedna hodnota kritickou mez 10 %, tak podle analýzy systému měření je soubor naměřených hodnot nevyhovující a žádá vylepšení.

Mezi příčiny, kvůli kterým je měření nevyhovující, může spadat špatné proškolení a manipulace měřitelů, nebo nedostatečná úprava povrchu měřených vzorku, která je pro správnost měření velmi důležitá. Dalšími předpoklady, které mohou ovlivnit přesnost měření jsou:

- Zatížení musí působit bez chvění a rázů
- okolní prostředí (teplota, vibrace, vlhkost)
- nedostatečný počet opakování měření
- opotřebení vnikacího tělíska

2.2.3. Měření na reálných dílcích

Poslední část měření je zaměřena na závislost mezi tvrdostí reálných dílců z materiálu Inconel 718 a parametrech obrábění, kterými jsou tyto dílce zpracovány.



Obr. 2.5 Ukázka měření tvrdosti reálných dílců

K dispozici je 5 dílů (ploch) obrobených za odlišných řezných podmínek. Řezné podmínky jsou vypsány v tabulce č. 14. Měření je opět prováděno třemi měřiteli. Každý měřitel provede na každém dílu celkem 10 měření. Z 10 hodnot se vypočte průměr. Mezivýsledkem jsou 3 průměrné hodnoty od třech měřitelů naměřené na jednom dílu z kterých se také vypočte výsledný průměr daného dílce.

Tab. 13 Výsledky měření reálných dílců

Díl	Měřitel	Číslo měření										Průměr naměřených hodnot	Průměr hodnot všech měřitelů	MIN	MAX	R	R [%]	σ	σ [%]
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
1. díl	1. měřitel	314	321	323	333	339	313	332	332	327	343	327,7	321,6	313	343	30	9,2%	10	3,1
	2. měřitel	318	318	330	331	323	345	315	325	333	306	324,4		306	345	39	12,0%	10	3,4
	3. měřitel	306	311	323	314	333	312	301	299	314	314	312,7		299	333	34	10,9%	10	3,3
2. díl	1. měřitel	359	325	334	325	343	340	332	345	311	322	333,6	373,4	311	359	48	14,4%	13	4,1
	2. měřitel	321	400	394	384	400	386	405	397	405	333	382,5		321	405	84	22,0%	28	7,8
	3. měřitel	465	401	299	449	366	348	447	449	454	363	404,1		299	465	166	41,1%	53	13,9
3. díl	1. měřitel	344	349	339	319	309	335	320	447	366	315	344,3	393,4	309	447	138	40,1%	38	11,5
	2. měřitel	423	413	450	444	414	427	453	405	448	457	433,4		405	457	52	12,0%	18	4,3
	3. měřitel	338	450	406	355	362	299	452	453	455	455	402,5		299	455	156	38,8%	55	14,5
4. díl	1. měřitel	477	443	450	507	504	492	469	453	463	446	470,4	464,5	443	507	64	13,6%	22	4,9
	2. měřitel	468	481	482	441	501	455	480	458	497	431	469,4		431	501	70	14,9%	72	16,9
	3. měřitel	438	492	477	467	435	409	473	458	413	475	453,7		409	492	83	18,3%	26	6
5. díl	1. měřitel	562	561	401	403	399	392	436	402	417	400	437,3	415,3	392	562	170	38,9%	61	14,7
	2. měřitel	401	410	423	410	402	413	397	409	403	416	408,4		397	423	26	6,4%	7	1,8
	3. měřitel	415	399	371	395	382	405	413	410	403	410	400,3		371	415	44	11,0%	13	3,5

Tab. 14 Přehled řezných podmínek a naměřených tvrdostí

Díl	Naměřená tvrdost [HV]	Řezné podmínky		
		Řezná rychlost [m/min]	Posuv [mm]	Hloubka řezu [mm]
1. díl	321,6	50	0,102	0,203
2. díl	373,4	50	0,203	0,254
3. díl	393,4	50	0,14	0,508
4. díl	464,5	22	0,203	0,254
5. díl	415,3	22	0,102	0,508

Z tabulky č. 14 je patrné, že nižší řezná rychlost a vyšší hodnota posuvu vede k vyšší tvrdosti povrchové vrstvy materiálu Inconel 718. Původní hodnota tvrdosti měřeného materiálu bez vlivu obrábění je 290 HV.

Naměřené hodnoty tvrdosti jsou naměřeny v hloubce $39 \pm 4 \mu\text{m}$. Hloubka byla spočítána podle úhlopříček vtisků Vickersova jehlanu, které byly odměřeny pomocí mikroskopu. Úhlopříčky se podařilo změřit pouze u 5. dílce. U zbylých dílců měření nebylo možné z důvodu, kterým jsou jejich nadměrné rozměry, ale hloubka vtisku je předpokládána za obdobnou.

3. Závěrečné zhodnocení

Bakalářská práce se zabývá vlivem parametrů obrábění vybraného materiálu, kterým je Inconel 718 na hodnoty tvrdosti povrchové vrstvy obrobku. Součástí práce je také zjištění, zda přenosný tvrdoměr SonoDur2, který zakoupila firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. a kterým je měřena většina měření je vhodný pro začlenění do provozu v dílnách této firmy.

V první části práce jsou popsány niklové superslitiny, jejich historie, rozdělení a využití a na to navazuje zaměření na materiál Inconel 718, kde je poznačena jeho hlavní charakteristika, chemické složení nebo třeba největší přednosti. Práce pokračuje popisem obrábění niklových superslitin, kde jsou zmíněny a rozebrány faktory podmiňující špatnou obrobitelnost a ve stručnosti definovány obráběcí operace jako je soustružení, frézování a vrtání. Dalším předmětem práce je měření tvrdosti. V této části jsou definovány zákonitosti problematiky a podrobně popsány nejběžnější statické zkoušky tvrdosti jako zkouška tvrdosti dle Brinella, zkouška tvrdosti dle Vickerse a zkouška tvrdosti dle Rockwella. Na to navazuje popis a vysvětlení problematiky měření mikrotvrdosti. Podkapitola tvrdosti je zakončená přenosnými tvrdoměry a popisem metod, díky kterým pracují. Na řadě je vliv obrábění na změnu tvrdost. V této podkapitole se řeší příčiny a následky vytvrzování povrchové vrstvy obráběného materiálu. V návaznosti na to je grafická ukázka vlivu různých řezných podmínek na profil mikrotvrdosti materiálu Inconel 718. Poslední podkapitolou jsou analytické a statistické nástroje Six Sigma se zaměřením na nástroj analýzy systému měření, zkráceně MSA.

V druhé části bakalářské práce je zaznamenán experiment. První jsou stručně sepsány požadavky na dosažení cíle. Poté je detailněji popsán přenosný tvrdoměr SonoDur2. Hned na to začíná návrh a provedení experimentu. První se provádí měření na třech kalibračních destičkách a výsledky i s doplňujícími výpočty jsou zobrazeny v tabulkách. Hned při měření na kalibračních destičkách je možné pozorovat překročení některých limitních hodnot, které určují přesnost měření. Pokračuje se měřením tvrdosti na vybraných vzorcích z Inconelu 718, které jsou předem změřeny v laboratoři pro potřebu přesného porovnání. Všechny tyto hodnoty jsou též v přehledných tabulkách. Hodnoty tvrdosti vybraných vzorků naměřené přenosným tvrdoměrem byly pomocí programu Minitab zpracovány podle metodiky MSA. Výstup programu potvrdil, že postup měření není dostatečně přesný. I přesto se provedlo závěrečné měření na reálných dílcích z Inconelu 718. Hodnoty naměřených tvrdostí a řezných podmínek, kterými byly dílce obráběny, jsou uvedeny v příslušných tabulkách. Po

porovnání výsledků je možné konstatovat, že se shodují s teoretickým tvrzením. Se snižující se řeznou rychlostí a se zvyšujícím se posuvem hodnota tvrdosti stoupá.

Poděkování

Na závěr chci poděkovat vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D., z Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulty strojní, VŠB – TU Ostrava za odborné vedení a cenné rady. Velké poděkování patří také Ing. Janu Machalovi a Ing. Ireně Nábělkové z firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. za veškeré rady a vedení při vypracování teoretické i praktické části bakalářské práce.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Použitá literatura

- [1] PETRŮ, J. *Hodnocení vybraných parametrů integrity povrchu po obrábění vysokými rychlostmi*. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, s. 167, 2015.
- [2] Calce. *Material hardness* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://www.calce.umd.edu/TSFA/Hardness_ad_.htm#3.3.
- [3] Hegewald-Peschke. General notes on hardness testing. *General notes on hardness testing* [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.hegewald-peschke.com/interesting-facts/guidelines-to-hardness-testing.html>.
- [4] KONDERLA, R. *Možnosti suchého obrábění niklových slitin*. Ostrava, 2011. 135 s. Disertační práce. VŠB – TU Ostrava. Školitel: doc. Dr. Ing. Ivan MRKVICA.
- [5] KLOOP, W. D. *Aerospace and high performance alloys database: General*. West Lafayette, Indiana, 1995.
- [6] KOCIÁN, P. *Obrábění materiálu typu Inconel 718*. Plzeň, 2012. 56 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Školitel: Ing. Miroslav Zetek Ph.D.
- [7] POPOVIČ J. *Studium fázových rovnováh v niklových slitinách s intermetalickými fázemi*. Disertační práce, Brno 2009.
- [8] Management mania. *Measurement system analysis* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/measurement-system-analysis>.
- [9] Zkoušky tvrdosti. *Mat Net* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>.
- [10] ADAMECH, M. *Porovnatelnosť mikrotvrdosti stanovenej pre rôzne zaťaženia a tvrdosti materiálu*, Bakalářská práce – Slovenská technická univerzita v Bratislavě. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave: Ústav materiálov, Školiteľ: Ing. Martin Javorský, 2011, 36s.
- [11] Specialmetals. Machinig Special. *Metals Corporation Products* [online]. 2002 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/assets/documents/alloys/incoloy/incoloy-alloy-925.pdf>.

- [12] DAVIS, J. R. *ASM Speciality Handbook: Nickel, Cobalt, and their Alloys*. ASM International, Ohio, USA, 2000. 421 p. ISBN 0-87170-658-7.
- [13] BRADLEY, E. F. *Superalloys, A Technical Guide*. ASM International. 1988. 256s.
- [14] Ikvalita. *Six Sigma* [online]. [cit. 2016-04-010]. Dostupné z: <http://www.ikvalita.cz/tools.php?ID=56>.
- [15] WILLIAMS R. S.: *Hardness and hardness measurements*, American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1942.
- [16] ZAŤKO, M., ECKHARDT, E. *Metody měření tvrdosti materiálů a zásady při volbě přenosných přístrojů na měření* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.ssndt.sk/files/odborne/Zakladne%20zasady%201.pdf>.
- [17] DARECKÝ, J. *Superzliatiny niklu a ich obrábanie*. Žilinská univerzita v Žilině: ŽU, 2001. ISBN 80-7100-785-4.
- [18] DONACHIE, M. J. *Superalloys. A technical guide*. 2nd ed. Materials Park, ASM International 2002. 437 s. ISBN 0-87170-749-7.
- [19] THAKUR, D. G., RAMAMOORTHY B. *Effect of High Speed Cutting Parameters on the Surface Characteristics of Superalloy Inconel* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010_pp2108-2111.pdf.
- [20] KOŠÍKOVÁ, J. *Základní myšlenky metodiky Six Sigma*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Bednář, Ph.D.
- [21] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: [s.n.], 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1.
- [22] *Zkoušky tvrdosti* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf.
- [23] NESLUŠAN, M., CZÁN, A. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilinská univerzita, Žilina: EDIS - vydavateľství ŽU, 2001. ISBN 80-7100-933-4.
- [24] DURAND-CHARRE, M. *The Microstructure of Superalloys*. Gordon & Breach Science Publishers, Amsterdam, 1997. 121 p.
- [25] JERSÁK, J., HANUS, P., KARÁSEK, J. *Vliv dokončovacího obrábění na kvalitu povrchové vrstvy obrobku* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.fvt.tuke.sk/journal/pdf08/2-str-17-20.pdf>.
- [26] DOLEŽAL P., PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů*. Vysoké učení technické v Brně, 2006, 41 s.

- [27] SOURMAIL, T. The superalloys. *Thomas-sourmail.net* [online]. 2009 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://thomas-sourmail.net/coatings/materials.html>.
- [28] MACHÁČ, M. *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s., 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
- [29] *Nickel base alloys* [online]. 1995 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/High_TemperatureHigh_StrengthNickel_BaseAlloys_393_.ashx.
- [30] MACHALA, J. *Nízkocyklová únava niklové superslitiny IN713LC s TBC vrstvou za vysokých teplot.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.
- [31] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, ALFA/SNTL Bratislava, 1985.